第40卷 第2期
2023年2月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 40 No. 2
Feb. 2023

紫花苜蓿根系抗拉力学特性及其影响因素研究

毛正君[1,2,3]， 耿咪咪[1]

（1. 西安科技大学地质与环境学院，陕西 西安 710054；2. 西安科技大学煤炭绿色开采地质研究院，陕西 西安 710054；3. 陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室，陕西 西安 710054）

摘 要：为分析草本植物单根的抗拉力学特性及其影响因素，以紫花苜蓿为研究对象，选取不同根系直径、根系长度的紫花苜蓿根系在不同加载速率下开展室内单根拉伸试验，定量分析紫花苜蓿单根抗拉力学特性及其在不同影响因素下的变化规律。结果表明：加载速率对紫花苜蓿根系抗拉力和抗拉强度具有极显著影响（$P<0.05$），且在根系直径<3 mm时，加载速率为500 mm·min^{-1}时根系抗拉力和抗拉强度最大，而当根系直径相对较粗时，加载速率为100 mm·min^{-1}时根系抗拉力和抗拉强度最大；根系长度与紫花苜蓿根系抗拉力、抗拉强度之间没有显著差异（$P>0.05$）；紫花苜蓿根系直径对根系抗拉力和抗拉强度具有显著影响（$P<0.001$），其与根系抗拉力呈幂函数正相关关系（$R^2=0.380$，$P<0.001$），与抗拉强度呈幂函数负相关关系（$R^2=0.363$，$P<0.001$）；通过对紫花苜蓿根系抗拉力学特性的影响因素进行多元线性回归分析，根系直径是影响植物根系抗拉力学特性的最主要因素。

关键词：紫花苜蓿；抗拉力学特性；加载速率；根系长度；根系直径

侵蚀是一种经常影响人类社会的自然现象，人类活动可能加速或抑制侵蚀的自然速度，进而改变侵蚀的模式和速度，有可能会给当地带来严重的后果[1]。目前，植被被认为是保护斜坡免受侵蚀和浅层滑坡的一种自然且有用的生物工程方法，受到了广泛关注和应用[2-5]。研究表明，植被可以通过地下根系的机械加固作用保护边坡免受浅层滑坡的影响[6]。

近几十年来，学者们开始对植物根系的固土效应开展了大量研究。科学实践表明，植物根系可通过缠绕、固结和串连土体等方式形成根土复合体，从而提高土体的抗剪强度，防止浅层滑坡和水土流失等类型的边坡浅层破坏[7-10]，并由于具备低投入、易养护和绿色环保等优点，成为景观效果差且结构逐步失效的传统工程护坡替代方案[11-12]。植物单根是植物护坡的基本单元，对植物单根开展的一系列研究是植物护坡研究的起点[13]。植物单根抗拉力学特性是直接代表植物根系抵抗外力的有效指标，也是量化植物护坡及根系固土的必要条件[14-15]。目前对根系抗拉特性的研究主要包括三类，即室内单根拉伸试验、室外原位水平拉拔及垂直拉拔试验。由于室内单根拉伸试验简单易行，且万能试验机测量精度高、范围广、试验控制度高，因此室内单根拉伸试验被广泛应用，且至今仍然是植物护坡研究的热点。目前，国内外学者对植物根系抗拉特性进行的大量研究表明，不同植物根系在其抗拉特性及固土护坡方面的力学表现存在差异[16-18]。综合来看，植物根系固土护坡的作用主要表现为：浅细根抵抗变形的能力较强，主要发挥加筋和减缓边坡或河岸变形、破坏的作用，而深粗根刚度强、抗拉强度较大，具有锚固、支撑作用，即当边坡或河岸土体产生变形时，穿插、缠绕在边坡和河岸土层中的植物根系将土层中的剪应力转化为根的拉应力，发挥了较强的牵拉作用，且由于根系具有较强的延伸特性，故在一定程度上可抑制或减缓边坡或河岸土体的变形[19-21]。但根系是一个复杂的三维结构，不同植物物种的根系在年龄、根类型、方向、分枝模式、与土壤的界面特性和直径方面都有所不同，所有这些因素都会导致根系抗拉强度具有较大的可变性[16]。因此，研究植物根系固土护坡效应时，有必要探讨根系抗拉力学特性及其影响因素。

收稿日期：2022-04-16； **修订日期：**2022-10-14
基金项目：陕西省重点研发计划项目（2020SF-379）；宁夏回族自治区重点研发计划项目（2022EG03052）
作者简介：毛正君（1983-），男，博士，副教授，主要从事地质环境保护与国土空间生态修复研究. E-mail: zhengjun_mao@163.com

植物根系抗拉力学特性的影响因素包括根系直径、采伐时间、含水率、根系内部化学成分和微观结构等材料自身特性,以及根系设定长度与加载速率等试验条件[19, 21-25]。但大多数研究主要集中在根系直径与根系抗拉特性的关系,且没有得到统一的结论[26]。如唐菡等[27]、刘子壮等[28]、钟荣华等[29]、黄广杰等[30]和Wang等[31]通过对不同草本植物进行拉伸试验,发现根系抗拉力、根系抗拉强度与根系直径存在非线性相关关系;胡晶华等[32]、刘昌义等[33]在对灌木植物根系进行的拉伸试验及Abdi等[34]对乔木根系进行拉伸试验中,也得到了此类结果;但李会科等[35]和田佳等[36]分别对乔木和草本植物根系进行的研究中指出,根系抗拉强度与根系直径呈线性相关关系;李晓凤等[37]和王剑敏[38]等分别对乔木和灌木植物根系进行的拉伸试验发现,根系直径与抗拉强度之间没有相关关系。植物根系在自然界遭受各种变化不定的荷载,如风速变化,径流冲击等,这些均使得根系遭受的荷载加载速率处于不断变化之中,其固土能力也存在明显差异[39]。当根系在抵御不同强度的风力侵蚀过程中,会将荷载传递给根系,进而改变林地边坡的应力与应变状态[40],且风力强度不同,其产生的荷载也存在差异;当加载速率较大时,植物根系与土体的摩擦锚固力提高,同时达到最大摩擦锚固力的滑移量增加,可以理解为林木自身对于自然界不断变化的荷载的一种自适应,提高了自身稳定性[39];此外,加载速率还与植物根系内部纤维含量、纤维排列紧密、疏松程度,以及根的其他物质组成有关[41-42],即当根系内部纤维越多,排列方向与受力方向一致,其更能适应快速加载。基于以上研究表明,以往的研究主要针对不同植物根系直径、加载速率等与抗拉力、抗拉特性的关系开展了相关研究,但尚未形成统一结论,并且缺乏综合分析,还需要加强研究。

紫花苜蓿属多年生草本,繁殖能力强,适应性强,耐干旱瘠薄,根系发达,能深入土层,固土能力强,护坡效果好,是黄土高原地区的先锋植物之一[43-45]。为了全面了解紫花苜蓿根系的抗拉力学特性,本研究对紫花苜蓿根系进行了室内单根拉伸试验,分析不同根系长度、根系直径和加载速率对紫花苜蓿根系抗拉力学特性的影响规律,并通过建立回归方程探究了加载速率、根系直径和根系长度与根系抗拉力学特性的关系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省西安市临潼区,海拔在350~1302 m之间,地形呈阶梯状,由南向北逐渐降低。研究区属东亚暖温带半湿润气候,多年平均气温13.7 ℃,极端低温-16.5 ℃,极端高温42.2 ℃,多年平均降水量为607.7 mm,降水主要集中在7—9月,且多为大雨或暴雨,区内年蒸发量为553.3 mm[46];野生植物主要有野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*)、车前(*Plantago asiatica*)、苜蓿(*Medicago sativa*)等。其中,紫花苜蓿作为该地区水土保持的先锋植物之一,能显著增强土体稳定性和抗侵蚀能力。因此,选取该区内生长期为2~3 a的紫花苜蓿进行试验。试验采样点现场情况如图1。

1.2 试验材料

本文选用紫花苜蓿作为研究对象进行单根拉伸试验。在获取紫花苜蓿根系时,选取同一生长环境下的生长状况相近的紫花苜蓿植株进行根系采集。为了避免取样过程中对根系的破坏影响,采用局部挖掘法先将根系周围土体清理使整个根系暴露出来,然后再用剪刀剪断完整的根系,并将其带回实验室;随后对根系进行清洗及修剪。待根系采集完毕后,随即对紫花苜蓿进行室内单根拉伸试验。紫花苜蓿单根拉伸试验过程见图2。

1.3 试验设计

本次单根拉伸试验考虑3个试验因素,即根长、根径以及加载速率。由于根径为植物自身性质,为不可控因素,故进行随机选取,并在试验前对其进行测量;而根长和加载速率的选取均可通过人为控制,故设定试验根系长度为0~50 mm、50~100 mm、100~150 mm、150~200 mm和200~250 mm 5个水平;由于外在荷载对植物的作用方式和作用过程会引起植物的固土能力的差异,因此为了研究外在荷载对根系固土能力的影响,本次试验设定加载速率为20、50、100、200 mm·min^{-1}和500 mm·min^{-1} 5个水平。本次紫花苜蓿根系单根拉伸试验设计分组见表1。为了表明本次试验中根长和根径各分组间是否显著,对其进行显著性检验。紫花苜蓿根系长度和根系直径分组显著性检验结果见表2,可见根长和根径各分组之间均具有显著性差异,故此次分组




图1　试验采样点现场情况

Fig. 1　Site conditions of sampling points



图2　单根拉伸试验过程

Fig. 2　Single tensile test process

合理。

本次试验设定受拉根段在夹具中间部位或接近中间处断裂的试验即为成功。本次试验共测定了605个苜蓿根系的抗拉强度,采集到可用数据302个,成功率为49.92%。根系直径和长度均采用精度为0.01 mm的数显游标卡尺测得。在测量根系直径时,将根系从上至下分为上、中、下3个部分,并测量以上3部分直径,然后求其平均值作为该根系的平均直径;根系长度则直接测量其全长。试验根系平均直径在2.0~7.0 mm之间,根系长度在48.79~242 mm之间。

表1　紫花苜蓿根系单根拉伸试验设计

Tab. 1　Design of single root tensile test of alfalfa root system

分级	根系直径/mm	加载速率/(mm·min^{-1})	根系长度/mm
1	2~3	20	0~50
2	3~4	50	50~100
3	4~5	100	100~150
4	＞5	200	150~200
5	–	500	200~250

1.4　单根拉伸试验

紫花苜蓿单根拉伸试验采用WDW-100电子万能试验机(图3)进行,该仪器能够在产生拉力的同时测量荷载与位移。仪器试验力的范围为0.4~100

表2　紫花苜蓿根系长度和根系直径分组显著性检验

Tab. 2　Analysis of significant difference between alfalfa root length and root diameter groups

	根系长度		根系直径	
	数量/个	平均值	数量/个	平均值
1	1	–	93	2.65±0.23a
2	29	83.36±15.27a	13	3.44±0.29b
3	178	126.06±13.27b	59	4.32±0.28c
4	69	181.47±15.01c	11	5.41±0.58d
5	19	209.54±11.82d	0	–

注:同列不同字母表示在0.05水平上差异显著。

kN,加载速率可调节范围为0.001~500 mm·min^{-1},试验载荷测量精度为±0.005 N,位移测量精度为±0.005 mm。

在单根拉伸试验开始之前,对根系样本进行全面的检查,剔除了有明显损伤的根系,选择直径变化不大且顺直少曲的单根。在试验前,先按照试验设计的根系长度调整万能试验机的标距,并将根系垂直放入试验机拉伸夹具中固定,随后开始拉伸试验。在试验过程中,试验机拉伸夹具向两端匀速拉伸根系,直至根系被完全拉断,此时的抗拉力即为单根最大抗拉力。此外,由于拉伸夹具为刚性材料,而根系为柔性材料,在试验过程中夹具可能会夹断根系,进而使试验结果产生误差。因此本试验通过在根系上、下两端包裹纸巾以增大根系与拉伸夹具间摩擦的方式,增大试验成功率,同时也可避免夹具作用造成的根系断裂。同时认为试验中断裂发生在根段中部或接近中间处断裂的试验即为成功(图4),并将该试验数据作为有效数据。



图3 WDW-100电子万能试验机

Fig. 3 WDW-100 electronic universal testing machine

本试验中,根系抗拉强度计算公式为:

$$T = 4F_{max}/\pi D^2 \quad (1)$$

式中:T为植物根系抗拉强度(MPa); F_{max}为植物根系最大抗拉力(N);D为植物根系直径(mm)。

1.5 数据分析

采用SPSS(SPSS Inc., Chicago, USA)进行试验数据统计分析,并进行协方差分析和单因素方差分析,研究不同根径、根长及加载速率对根系抗拉力和抗拉强度是否产生显著影响;此外,对数据进行标准化处理并进行多元回归分析,以比较根径、根长和加载速率对根系抗拉特性的影响程度大小。



图4 拉伸试验实例

Fig. 4 Tensile test example

2 结果与分析

2.1 加载速率与紫花苜蓿根系抗拉特性的关系

通过对紫花苜蓿根系进行不同加载速率的单根拉伸试验,得到不同加载速率下的紫花苜蓿根系抗拉力和抗拉强度,以根长为100~150 mm的紫花苜蓿根系样本为例,其根系抗拉力、抗拉强度与根系直径的关系曲线见图5。表3为紫花苜蓿根系平均抗拉力和抗拉强度,由表3可见,紫花苜蓿根系最大平均抗拉力为184.78±117.94 N,最大平均抗拉强度为19.96±5.59 MPa。以根系直径为协变量,加载速率为自变量,根系抗拉力和抗拉强度为因变量进行协方差分析,由表4可知,20 mm·min^{-1}、50 mm·min^{-1}、100 mm·min^{-1}、200 mm·min^{-1}及500 mm·min^{-1}加载速率下加载速率和根系直径均对根系抗拉力和抗拉强度有极显著影响。

结合图5和表3可知,根系抗拉力随根系直径增加呈显著增加趋势,而根系抗拉强度随根系直径的增加呈降低趋势;紫花苜蓿根系在加载速率为100 mm·min^{-1}时,其抗拉力增加幅度最大,且在根系直径<3 mm时,加载速率为500 mm·min^{-1}时根系抗

拉力最大，而当根系直径>3.7 mm时，加载速率为100 mm·min^{-1}时根系抗拉力最大；在根系直径<3 mm时，加载速率为500 mm·min^{-1}时抗拉强度最大，而当根系直径>3 mm时，加载速率在100 mm·min^{-1}时的根系抗拉强度则最大。由此可见，根径较小的根系具有较高的抗拉效果，若其在边坡快速破坏过程中充分发挥出来，将有效提高边坡稳定性。

2.2　根系长度与紫花苜蓿根系抗拉特性的关系

图6a中根系长度为50~100 mm和图6b中根系长度为200~250 mm时的曲线存在异常，其原因在于该长度段的根系数量较少，故导致拟合效果不理想，因此在分析时不考虑该异常曲线。由图6可见，当加载速率为200 mm·min^{-1}时，不同根系长度下根系抗拉力随根系直径的增加整体上呈逐渐增长的趋势，根系抗拉强度随根系直径的增加整体上呈逐渐降低的趋势；当根系直径<3.4 mm时，根系长度为100~150 mm时的根系抗拉力最大，根系直径>3.4 mm时，根系长度为200~250 mm时的根系抗拉力最大；根系抗拉强度与根系长度没有明显关系。采用单因素方差分析(ANOVA)分析了加载速率为

表3　不同加载速率下紫花苜蓿根系平均抗拉力和抗拉强度

Tab. 3　Average root tensile force and tensile strength of alfalfa under different loading rates

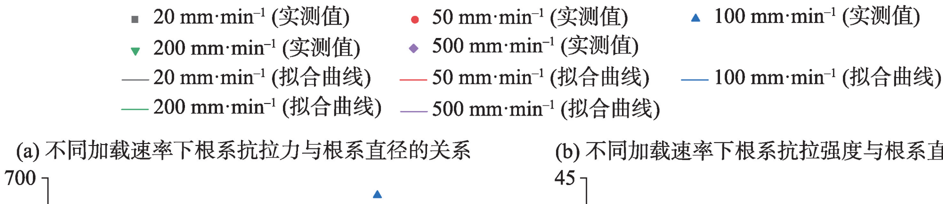
加载速率/(mm·min^{-1})	根系样本数量/个	平均根系直径/mm	平均抗拉力/N	平均抗拉强度/MPa
20	26	3.27±0.55	141.00±36.14	17.50±5.37
50	43	3.52±0.67	152.86±45.08	16.44±5.18
100	37	3.47±0.76	184.78±117.94	19.18±6.43
200	49	3.32±0.79	168.06±64.80	19.96±5.59
500	23	3.34±0.70	161.42±70.55	18.96±5.97

表4　加载速率对根系抗拉力、抗拉强度影响的协方差分析结果

Tab. 4　Covariance analysis of effects of loading rate on root tensile force and tensile strength

抗拉特性	根系样本数量/个	*F*值		*P*值	
		加载速率	根系直径	加载速率	根系直径
抗拉力	178	3.474	122.348	0.009**	<0.001**
抗拉强度	178	3.474	89.298	0.009**	<0.001**

注：**表示显著性水平 $P<0.01$。下同。



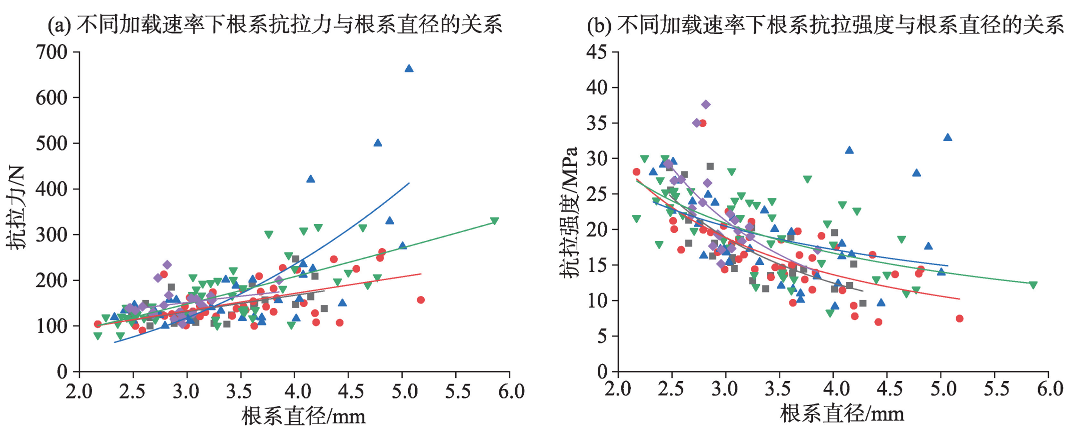


图5　不同加载速率下根系抗拉力、抗拉强度与根系直径的关系

Fig. 5　Relationship between root tensile strength and root diameter under different loading rates

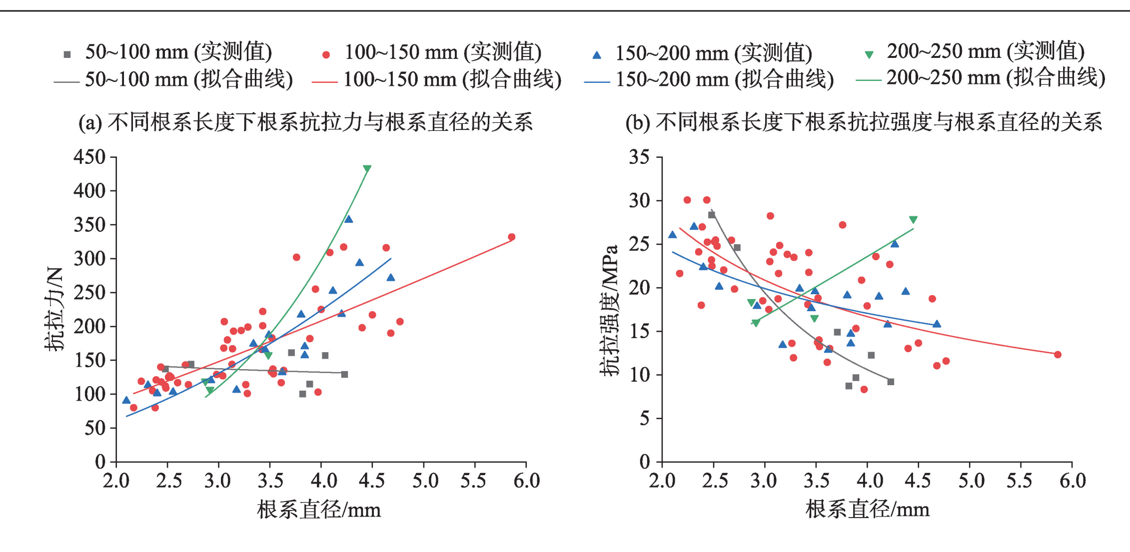


图6 不同根系长度下根系抗拉力、抗拉强度与根系直径的关系

Fig. 6 Relationship between root tensile properties and root diameter at different root lengths

200 mm·min^{-1}时样本长度对根系抗拉力和抗拉强度的影响(表5)。通过单因素方差分析的结果可以看出,紫花苜蓿根系长度对根系抗拉力和抗拉强度没有显著影响。这与其他研究结果存在差异[19, 26],其原因可能是由于各长度段的根系样本数较少。

2.3 根系直径与紫花苜蓿根系抗拉特性的关系

由图7可见,当根系在100~150 mm长度段时,紫花苜蓿根系抗拉力与直径呈正相关关系,根系抗拉力随根系直径的增加整体上呈上升趋势,表明紫花苜蓿根系较粗时具有较大的极限抗拉力;但紫花苜蓿根系抗拉强度与根系直径呈负相关关系,即抗拉强度随根系直径的增加整体上呈降低趋势。对该长度段的紫花苜蓿根系直径与抗拉力、抗拉强度进行单因素方差分析(表6)。由表6可见,紫花苜蓿根系抗拉力、抗拉强度与根系直径之间差异显著。

通过对紫花苜蓿根系直径与根系抗拉力、抗拉强度进行回归分析可知,紫花苜蓿根系直径与根系抗拉力之间呈幂函数正相关关系,而紫花苜蓿根系直径与根系抗拉强度之间呈幂函数负相关关系,其相关系数分别为0.380、0.363,呈中度相关关系,其

表5 紫花苜蓿根系长度对根系抗拉力和抗拉强度影响的单因素方差分析结果

Tab. 5 Results of one-way ANOVA of effects of alfalfa root length on root tensile characteristics

抗拉特性	根系样本数量/个	F值	P值
抗拉力	78	1.002	0.397
抗拉强度	78	1.452	0.235

回归方程见表7。

2.4 紫花苜蓿根系抗拉特性影响因素的多元回归分析

为了研究根系抗拉特性影响因素对紫花苜蓿根系抗拉特性影响程度的大小,本文以根系加载速率(x_1)、根系直径(x_2)和根系长度(x_3)作为自变量,根系抗拉力(y_1)和抗拉强度(y_2)为因变量,进行多元回归分析。由于根系长度(x_3)对根系抗拉力和抗拉强度没有显著影响($P>0.05$),故不引入根系长度变量。通过标准化(Z-score)公式把不同量纲的数据转化为无量纲的标准化数据[36]。将自变量进行标准化处理后,分别与抗拉力和抗拉强度进行多元回归分析,得到回归方程中的各项系数,其回归模型如下式所示:

$$y_1=-1.656\times10^{-16}+0.100x_1+0.679x_2 \quad (R^2=0.453,\ P<0.001) \tag{2}$$

$$y_2=-2.910\times10^{-16}+0.156x_1-0.526x_2 \quad (R^2=0.324,\ P<0.001) \tag{3}$$

由上式可以看出,根系抗拉力与抗拉强度的回归方程相关性显著。加载速率与根系抗拉力、抗拉强度呈显著正相关关系,根系直径与根系抗拉力呈显著正相关关系,与根系抗拉强度呈显著负相关关系;其中式(2)和式(3)回归方程中各项回归系数的绝对值大小为:x_2(0.679)>x_1(0.100),x_2(0.526)>x_1(0.156),表明根系直径对根系抗拉力与抗拉强度的影响最大,根系直径越大,根系抗拉力越大,根系的抗拉强度越小;加载速率也对根系抗拉力和抗拉强

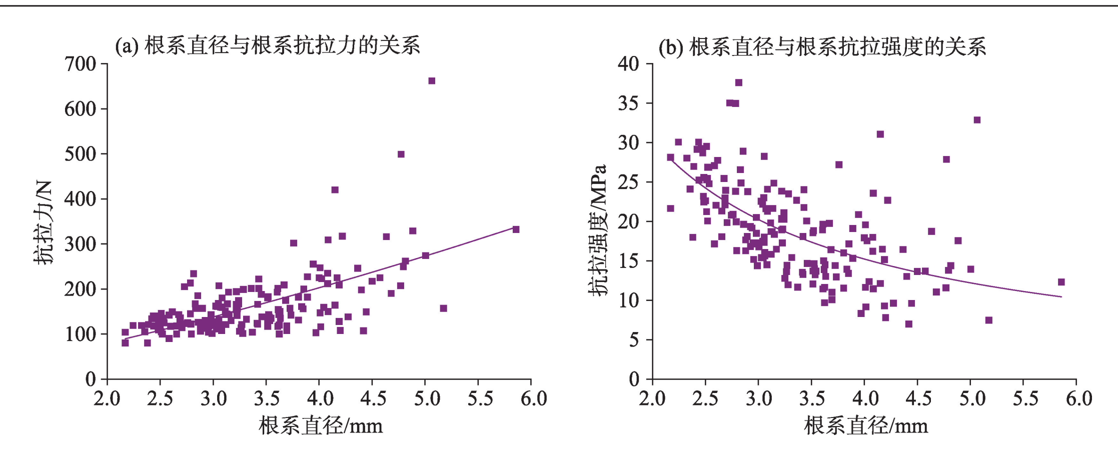


图7　紫花苜蓿根系抗拉力、抗拉强度与根系直径的关系

Fig. 7　Relationship between root tensile properties and root diameter of alfalfa

表6　紫花苜蓿根系直径对根系抗拉力、抗拉强度影响的单因素方差分析结果

Tab. 6　Results of one-way ANOVA on the effect of alfalfa root diameter on root tensile resistance and tensile strength

抗拉特性	根系样本数量/个	F值	P值
抗拉力	178	37.145	<0.001**
抗拉强度	178	26.140	<0.001**

表7　紫花苜蓿根系直径与根系抗拉力、抗拉特性的幂函数关系

Tab. 7　Power function relationship between root diameter and root tensile characteristics

抗拉特性	拟合方程	R^2	P值
抗拉力	$F=31.896D^{1.334}$	0.380	<0.001**
抗拉强度	$F=60.004D^{-0.989}$	0.363	<0.001**

度有显著影响。

3　讨论

3.1　草本植物根系抗拉特性的影响因素及其固土效应

植物根系抗拉特性是植物根系抵抗外力和根系固土效应的有效指标之一[47]。植物根系抗拉力学特性主要受其自身特性、试验条件等的影响。本研究通过对紫花苜蓿根系进行单根拉伸试验，发现紫花苜蓿根系抗拉力、抗拉强度仅与加载速率和根系直径呈显著相关。在根系直径<3 mm时，加载速率为500 mm·min^{-1}时根系抗拉力和抗拉强度最大，而当根系直径相对较粗时，加载速率为100 mm·min^{-1}时根系抗拉力和抗拉强度最大，这与李宁等[26]、李可等[19]的研究结果存在差异，他们指出根系抗拉力和抗拉强度随着加载速率的增大而减小，而Cofie等[48]则指出加载速率越大，抗拉强度越大。出现该结果的原因可能是由于根的结构、根系直径的不均匀性以及根系生长期的不确定性所致[23]。本次试验结果发现根系直径与根系抗拉力、抗拉强度呈幂函数相关关系，这与目前大多数研究结果一致[49-55]。由此可见，较细的根系更有利于提高边坡稳定性，这可能由于细根与土体颗粒的结合更加紧密。此外，本研究还发现根系长度与根系抗拉力、抗拉强度没有明显关系，这与李晓凤等[37]、欧阳前超等[56]、吕春娟等[57]在根系长度对抗拉特性影响的研究结果不一致，其原因可能是由于不同长度段内根系数量较小且根系直径分布不均匀。

植物根系能显著提高土质边坡的稳定性，主要原因之一就是植物根系具有较强的抗拉特性和变形特性[58]。植物根系与土形成一种复合材料即根土复合体，类似于将抗拉强度高且有一定柔韧性的加筋材料嵌入抗拉强度较低的土壤基质中，通过土体与根系之间的相互作用，进而提高边坡稳定性[13, 58-60]。紫花苜蓿属多年生草本植物，枝叶茂盛，根系粗壮且发达，根系分布深度较浅，大部分集中于0~30 cm处，且须根的数量占该深度范围内根系总量的一半以上[61]。紫花苜蓿的须根与土体相互缠绕，且其主根深入土层以锚固边坡土壤，进而增加土壤抗滑和抗剪切破坏的能力。从固土抗蚀的角度来看，根系由于滑坡、崩塌等作用而受到的剪应力会转变为拉力的作用，进而增强土体强度[58, 62]。同时，随着紫花苜蓿生长期的增加，其根系数量越多，根径越粗，分布越广，根系与土壤接触面积越

大，紫花苜蓿的单根抗拉力和抗拉强度就越大，其根系固土性能也就越强。

3.2 夹具效应

试验时直接用夹具夹住根系端部会对根系造成一定程度的损伤，试验的失败往往是由于夹具破坏了根系结构，导致在进行拉伸试验时根系在夹具接触处及其附近断裂。为了避免这一问题，学者们采用环氧树脂胶加固根部[50,55,63]、在夹具与试样之间垫橡胶与砂纸[14]、在夹具与试样之间垫软木块[64]、将根系缠绕在夹具上[65]等方法，在不同的试验条件下均取得了不错的效果。为了测得紫花苜蓿新鲜根系的抗拉强度，本次试验在采样完将根系清洗并修剪后直接进行单根拉伸试验。但由于新鲜根系的含水率较大，根系在受到拉伸时通常会在夹具处滑脱，进而影响试验的成功率，因此本文采用环氧树脂胶加固根部的方式进行了试验。结果发现此方法仅适用于含水率较低的根系，对于新鲜根系，较高的含水率会影响环氧树脂胶与根系的粘结，即使将表皮刮去，内部纤维与胶体之间也仅仅是形成了一层膜，脱膜时根系容易整体滑出（图8）。此外，由于根系直径分布不均匀，往往呈现根系直径一边大一边小的情况，直接用夹具将根系固定进行试验时，根系直径小的一端容易因为摩擦力不足而滑出夹具。因此，在本次试验中采用纸巾包裹根系直径较小一端的方法来防止根系滑出（图9），大大提高了试验的成功率。该方法虽然能够提高摩擦力，但是并不能忽略夹具对根系的破坏力，在今后的试验中夹具与根系样本接触的方法还有待提高。



图8 刮皮后根系脱模时从环氧树脂胶内拔出

Fig. 8 Root system removed from epoxy resin adhesive during stripping after scraping



图9 用纸巾包裹根系直径较小端部后进行试验

Fig. 9 Wrap the end of the root with paper towel and conduct the experiment

4 结 论

本文以紫花苜蓿根系为研究对象，通过对不同直径、不同长度的紫花苜蓿根系在不同加载速率下进行室内单根拉伸试验，分析了紫花苜蓿根系的抗拉力学特性及其影响因素，并通过协方差分析、单因素方差分析及回归分析研究了各影响因素与抗拉力和抗拉强度的关系，得出以下结论：

（1）在对紫花苜蓿根系的单根拉伸试验中，紫花苜蓿根系抗拉力和抗拉强度在不同加载速率下均呈现显著差异性（$P<0.05$），在根系直径 < 3 mm时，加载速率为500 mm·min^{-1}时根系抗拉力和抗拉强度最大，而当根系直径相对较粗时，加载速率为100 mm·min^{-1}时根系抗拉力和抗拉强度最大，说明在边坡的快速破坏过程中，较细的植物根系可以更好地发挥其抗拉强度较高的特点，可以有效提高边坡土体的稳定性。

（2）本次试验中，紫花苜蓿根系长度与根系抗拉力、抗拉强度没有显著差异（$P>0.05$）。

(3) 单根拉伸试验表明,紫花苜蓿根系直径与根系抗拉力、抗拉强度均具有显著差异性(P<0.001)。且紫花苜蓿根系抗拉力随着根系直径的增大呈幂函数正相关关系(R^2=0.380,P<0.001),而根系抗拉强度随根系直径的增大呈幂函数负相关关系(R^2=0.363,P<0.001)。

(4) 通过进行多元线性回归分析表明,根系直径是影响根系抗拉力与抗拉强度的最主要因素,根系直径越大,根系抗拉力越大,根系的抗拉强度越小。

参考文献(References):

[1] Hu X S, Brierley G, Zhu H L, et al. An exploratory analysis of vegetation strategies to reduce shallow landslide activity on loess hillslopes, Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(4): 668–686.

[2] Fan C C, Su C F. Role of roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content[J]. Ecological Engineering, 2008, 33(2): 157–166.

[3] 栗岳洲, 付江涛, 胡夏嵩, 等. 土体粒径对盐生植物根–土复合体抗剪强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 403–412. [Li Yuezhou, Fu Jiangtao, Hu Xiasong, et al. Experimental study of the influence of grain size on the shear strength of rooted soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 403–412.]

[4] Li Q, Liu G B, Zhang Z, et al. Effect of root architecture on structural stability and erodibility of topsoils during concentrated flow in hilly Loess Plateau[J]. Chinese Geographical Science, 2015, 25(6): 757–764.

[5] Comino E, Marengo P. Root tensile stregth of three shrub species: *Rosa canica*, *Cotoneaster dammeri* and *Jumiperus horizontalis*: Soil reinforcement estimation by laboratory[J]. Catena, 2010, 82(3): 227–235.

[6] Zhang C B, Zhou X, Jiang J, et al. Root moisture content influence on root tensile tests of herbaceous plants[J]. Catena, 2019, 172: 140–147.

[7] Zhou Y Y, Wang X M. Mesomechanics characteristics of soil reinforcement by plant roots[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2019, 78(5): 3719–3728.

[8] 付江涛, 余冬梅, 李晓康, 等. 柴达木盆地盐湖区盐生植物根–土复合体物理力学性质指标概率统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(8): 1696–1709. [Fu Jiangtao, Yu Dongmei, Li Xiaokang, et al. Statistical probability analysis of the physical index of rooted soil in Qiadam basin[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(8): 1696–1709.]

[9] Lbmann M T, Tonin R, Wellstein C, et al. Determination of the surface-mat effect of grassland slopes as a measure for shallow slope stability[J]. Catena, 2020, 187: 104256.

[10] 白潞翼, 刘静, 胡晶华, 等. 紫穗槐直根力学性质研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1111–1119. [Bai Luyi, Liu Jing, Hu Jinghua, et al. Deformation characteristics of the straight roots of *Amorpha fruticosa*[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1111–1119.]

[11] Veylon G, Ghestem M, Stokes A, et al. Quantification of mechanical and hydric components of soil reinforcement by plant roots[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(11): 1839–1849.

[12] Yildiz A, Graf F, Rickli C, et al. Determination of the shearing behaviour of root-permeated soils with a large-scale direct shear apparatus[J]. Catena, 2018, 166: 98–113.

[13] 陈丽华, 余新晓, 宋维峰, 等. 林木根系固土力学机制[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 1–9. [Chen Lihua, Yu Xinxiao, Song Weifeng, et al. Mechanical Mechanism of Soil Fixation by Forest Roots[M]. Beijing: Science Press, 2008: 1–9.]

[14] De Baets S, Poesen J, Reubens B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength[J]. Plant Soil, 2008, 305(2): 207–226.

[15] 雷相科, 张雪彪, 杨启红, 等. 植物根系抗拉力学性能研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33(4): 703–711. [Lei Xiangke, Zhang Xuebiao, Yang Qihong, et al. Research progress on the tensile mechanical properties of plant roots[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2016, 33(4): 703–711.]

[16] Capilleri P P, Cuomo M, Motta E, et al. Experimentalinvestigation of root tensile strength for slope stabilization[J]. Indian Geotechnical Journal, 2019, 49(6): 687–697.

[17] 周林虎, 徐志闻, 周国英, 等. 青藏铁路沱沱河段取土场草本根系力学强度试验[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1353–1361. [Zhou Linhu, Xu Zhiwen, Zhou Guoying, et al. Mechanical strength test of herb roots on the earth-borrowed area of Tuotuohe River section of Qinghai-Tibet Railway[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1353–1361.]

[18] 刘亚斌, 李淑霞, 余冬梅, 等. 西宁盆地黄土区典型草本植物单根抗拉力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 157–166. [Liu Yabin, Li Shuxia, Yu Dongmei, et al. Experiment on single root tensile mechanical properties of typical herb species in loess region of Xining Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(15): 157–166.]

[19] 李可, 朱海丽, 宋路, 等. 青藏高原两种典型植物根系抗拉特性与其微观结构的关系[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 240–249. [Li Ke, Zhu Haili, Song Lu, et al. Relationship between tensile properties and microstructure of two typical plant roots in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2): 240–249.]

[20] 张玉, 朱海丽, 张珂, 等. 3种滨河植物单根抗拉特性与其微观结构关系[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 572–583. [Zhang Yu, Zhu Haili, Zhang Ke, et al. Relationship between tensile properties and microstructure of single root of three riparian plants[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 572–583.]

[21] Boldrin D, Leung A K, Bengough A G. Root biomechanical proper-

ties during establishment of woody perennials[J]. Ecological Engineering, 2017, 109: 196–206.

[22] 姚文艺, 刘国彬. 新时期黄河流域水土保持战略目标的转变与发展对策[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 333–340. [Yao Wenyi, Liu Guobin. Strategic goal change and development countermeasures of soil and water conservation in Yellow River Basin in new period[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 333–340.]

[23] Zhang C B, Chen L H, Jiang J, et al. Effects of gauge length and strain rate on the tensile strength of tree roots[J]. Trees, 2012, 26 (5): 1577–1584.

[24] Yang Y, Chen L H, Li N. How gauge length and loading rate influence the root tensile strength of *Betula platyphylla*[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 71(6): 460–466.

[25] 朱锦奇, 王云琦, 王玉杰, 等. 四川山矾根系分支节点对根系固土效益的影响[J]. 林业科学, 2021, 57(2): 115–125. [Zhu Jinqi, Wang Yunqi, Wang Yujie, et al. Effects of root branch of symplocos setchuensis on root soil reinforcement[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(2): 115–125.]

[26] 李宁, 陈丽华, 杨苑君. 油松、华北落叶松根系抗拉特性的影响因素[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(12): 77–84. [Li Ning, Chen Lihua, Yang Yuanjun. Factors influencing root tensile properties of *Pinus Tabuliformis* and *Larix principis-rupprechtii*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(12): 77–84.]

[27] 唐菡, 谌芸, 刘枭宏, 等. 喀斯特坡地拉巴豆地埂篱根及根-土复合体力学特性[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 6114–6125. [Tang Han, Chen Yun, Liu Xiaohong, et al. Study on the mechanic features of root and root-soil matrix of *Dolichos lablab* L. hedgerows on the slopes of the karst area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (16): 6114–6125.]

[28] 刘子壮, 高照良, 杜峰, 等. 黄土高原高速公路护坡植物根系分布及力学特性研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 66–71. [Liu Zizhuang, Gao Zhaoliang, Du Feng, et al. Study on distribution and mechanical properties of plant roots for highway slope protection in Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(4): 66–71.]

[29] 钟荣华, 鲍玉海, 贺秀斌, 等. 三峡水库消落带4种草本根系抗拉特性及根系粘聚力[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 188–194. [Zhong Ronghua, Bao Yuhai, He Xiubin, et al. Root tensile properties and root cohesion of 4 herbaceous plant species in the Riparian Zone of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(4): 188–194.]

[30] 黄广杰, 段青松, 李建兴, 等. 三江并流区水库消落带5种草本根系形态及抗拉特性[J]. 水土保持研究, 2022, 29(3): 389–395. [Huang Guangjie, Duan Qingsong, Li Jianxing, et al. Root morphology and tensile characteristics of five kinds of herbs in reservoirs fluctuating zone of three parallel rivers[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(3): 389–395.]

[31] Wang Chenglong, Zhang Xin, Liu Jing, et al. The profiles and tensile strength on straight roots of plants withstand transient tensile injured after self-repair[J]. Sciencific Report, 2020, 10(1): 11468.

[32] 胡晶华, 刘静, 白潞翼, 等. 沙柳直根抗拉特性对循环荷载的响应[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 900–907. [Hu Jinghua, Liu Jing, Bai Luyi, et al. Straight root tensile properties of o *Salix psammophila* species in response to cyclic loading[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 900–907.]

[33] 刘昌义, 胡夏嵩, 赵玉娇, 等. 寒旱环境草本与灌木植物单根拉伸试验强度特征研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(1): 1–10. [Liu Changyi, Hu Xiasong, Zhao Yujiao, et al. Strength characteristics of single root tensile test of herbs and shurbs in cold and arid environment[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(1): 1–10.]

[34] Abdi Ehsan, Saleh Hamid R, Majnonian Baris, et al. Soil fixation and erosion control by *Haloxylon persicum* roots in arid lands, Iran [J]. Journal of Arid Land, 2019, 11(1): 86–96.

[35] 李会科, 王忠林, 贺秀贤. 地埂花椒林根系分布及力学强度测定[J]. 水土保持研究, 2000, 7(1): 38–41. [Li Huike, Wang Zhonglin, He Xiuxian. Root systems distribution of prickly ash in terrace edge and determination of their strength of force[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2000, 7(1): 38–41.]

[36] 田佳, 刘耀辉. 华北地区几种常用边坡绿化植物的根系力学特性研究[J]. 中国水土保持, 2007, 307(10): 34–36. [Tian Jia, Liu Yaohui. Study on root mechanical characteristics of several commonly used slope greening plants in North China[J]. Soil And Water Conservation In China, 2007, 307(10): 34–36.]

[37] 李晓凤, 陈丽华, 王萍花. 华北落叶松根系抗拉力学特性[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(1): 82–87. [Li Xiaofeng, Chen Lihua, Wang Pinghua. Tensile mechanical properties of roots of *Larix principis-rupprechtii*[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(1): 82–87.]

[38] 王剑敏, 沈烈英, 赵广琦. 中亚热带优势灌木根系对土壤抗剪切力的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(2): 47– 50. [Wang Jianmin, Shen Lieying, Zhao Guangqi. Effects of the root systems of dominant shrub species in mid-subtropical forest on soil anti-shearing strength enhancement[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2011, 35(2): 47–50.]

[39] 刘小光. 林木根系与土壤摩擦锚固性能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013. [Liu Xiaoguang. Study on the Friction and Anchorage Characteristics Between Root System and Soil[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.]

[40] 田佳. 植物护坡原理与数值模拟研究[M]. 银川: 宁夏人民出版社, 2021: 1–28. [Tian Jia. Study on Principle and Numerical Simulation of Plant Slope Protection[M]. Yinchuan: Ningxia People's Publishing House, 2021: 1–28.]

[41] 赵丽兵, 张宝贵. 紫花苜蓿和马唐根的生物力学性能及相关因素的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 7–12. [Zhao Libing, Zhang Baogui. Experimental study on root bio-mechanics and relevant factors of *Medicago sativa* and *Digitaria sanguinalis*[J].

Journal of Agricultural Engineering, 2007, 23(9): 7-12.]

[42] 吕春娟. 乔木根系抗拉力学特性及其与化学成分关系[D]. 北京: 北京林业大学, 2013. [Lv Chunjuan. Tensile Mechanical Properties and Relation with Chemical Components of Tree Root [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.]

[43] 杨吉华, 张光灿, 刘霞, 等. 紫花苜蓿保持水土效益的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(2): 91-96. [Yang Jihua, Zhang Guangcan, Liu Xia, et al. Study on benefits of alfalfa conservating soil and water[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1997, 3(2): 91-96.]

[44] 周霞, 魏杨, 李东嵘, 等. 黄土区紫花苜蓿根系对土体抗剪性能的影响[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(2): 53-59. [Zhou Xia, Wei Yang, Li Dongrong, et al. Strengthening effects of alfalfa roots on soil shear resistance in loess region[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(2): 53-59.]

[45] 周霞, 李东嵘, 蒋静, 等. 紫花苜蓿根系拉拔试验研究[J]. 人民长江, 2019, 50(7): 185-188. [Zhou Xia, Li Dongrong, Jiang Jing, et al. Study on anti-pulling test of alfalfa root system[J]. Yangtze River, 2019, 50(7): 185-188.]

[46] 雎卯民. 临潼县志[M]. 上海: 上海人民出版社, 1991: 100-123. [Ju Maomin. Lintong County Records[M]. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 1991: 100-123.]

[47] 苏雪萌, 刘俊娥, 周正朝, 等. 黄土丘陵区不同植物根系抗拉力学特性[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 259-264. [Su Xuemeng, Liu Jun'e, Zhou Zhengchao, et al. Root tensile and mechanical properties of three typical plants in the Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 259-264.]

[48] Cofie P, Koolen A J. Test speed and other factors affecting the measurements of tree root properties used in soil reinforcement models [J]. Soil & Tillage Research, 2001, 63(1-2): 51-56.

[49] Burroughs E R, Thomas B R. Declining Root Strength in Douglas-fir After Felling as a Factor in Slope Stability[M]. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1977.

[50] Nilaweera N S, Nutalaya P. Role of tree roots in slope stabilisation [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1999, 57(4): 337-342.

[51] Operstein V, Frydman S. The influence of vegetation on soil strength [J]. Ground Improvement, 2000, 4(2): 81-89.

[52] Bischetti G B, Chiaradia E A, Simonato T, et al. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy) [J]. Plant Soil, 2005, 278(1-2): 11-22.

[53] Bischetti G B, Chiaradia E A, Epis T, et al. Root cohesion of forest species in the Italian Alps[J]. Plant Soil, 2009, 324(1-2): 71-89.

[54] Mattia C, Bischetti G B, Gentile F. Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species[J]. Plant Soil, 2005, 278(1-2): 23-32.

[55] Tosi M. Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the northern Apennines (Italy)[J]. Geomorphology, 2007, 87(4): 268-283.

[56] 欧阳前超, 魏杨, 周霞, 等. 土石山区护坡草本植物根系抗拉力学特性[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(4): 35-41. [Ouyang Qianchao, Wei Yang, Zhou Xia, et al. Root tensile properties of the herbaceous plants for slope protection in earth-rocky mountain area, northern China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(4): 35-41.]

[57] 吕春娟, 陈丽华, 周硕, 等. 油松根系固土的基本力学特性[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 17-20, 25. [Lyu Chunjuan, Chen Lihua, Zhou Shuo, et al. Root basic mechanical properties of soil reinforcemnet of *Pinus tabulaeformis*[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 17-20, 25.]

[58] 吕春娟, 陈丽华, 周硕, 等. 不同乔木根系的抗拉力学特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S1): 329-335. [Lyu Chunjuan, Chen Lihua, Zhou Shuo, et al. Root mechanical characteristics of different tree species[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(S1): 329-335.]

[59] 陈昌富, 刘怀星, 李亚平. 草根加筋土的室内三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2041-2045. [Chen Changfu, Liu Huaixing, Li Yaping. Laboratory triaxial test of grassroots reinforced soil [J]. Geotechnical Mechanics, 2007, 28(10): 2041-2045.]

[60] 杨果林. 现代加筋土技术应用与研究进展[J]. 力学与实践, 2002, 24(1): 9-17. [Yang Guolin. Application and research progress of modern reinforced soil technology[J]. Mechanics and Practice, 2002, 24(1): 9-17.]

[61] 周霞, 魏杨, 李东嵘, 等. 黄土区紫花苜蓿根系对土体抗剪性能的影响[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(2): 53-59. [Zhou Xia, Wei Yang, Li Dongrong, et al. Strengthening effects of alfalfa roots on soil shear resistance in loess region[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(2): 53-59.]

[62] 刘亚斌, 李淑霞, 余冬梅, 等. 西宁盆地黄土区典型草本植物单根抗拉力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 157-166. [Liu Yabin, Li Shuxia, Yu Dongmei, et al. Experiment on single root tensile mechanical properties of typical herb species in loess region of Xining Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(15): 157-166.]

[63] Ammann M, Boll A, Rickli C, et al. Significance of tree root decomposition for shallow landslides[J]. Forest Snow and Landscape Research, 2009, 82(79-94): 79.

[64] Hales T, Cole-Hawthorne C, Lovell L, et al. Assessing the accuracy of simple field based root strength measurements[J]. Plant Soil, 2013, 372(1-2): 553-565.

[65] Preti F, Giadrossich F. Root reinforcement and slope bioengineering stabilization by Spanish broom (*Spartium junceum* L.)[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(9): 1713-1726.

Study on tensile mechanical properties of alfalfa roots and the influencing factors

MAO Zhengjun[1,2,3], GENG Mimi[1]

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Geological Research Institute for Coal Green Mining, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Geological Support for Coal Green Exploitation, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: We analyzed the tensile properties and its influencing factors of a single root of the pioneer herbaceous plant alfalfa (*Medicago sativa* Linn.). Alfalfa roots with different root diameters and lengths were selected for indoor single-root tensile tests under different loading rates. The tensile force and tensile strength of a single root were estimated quantitatively for different root diameters, root lengths, and loading rates. The results showed loading rate had a significant effect on the tensile force and tensile strength of alfalfa roots (P<0.05). For a root diameter less than 3 mm, the tensile force and tensile strength reached their maximum at the loading rate of 500 mm·min^{-1}. However, when the root diameter was relatively thick, the tensile force and tensile strength of alfalfa roots reached their maximum at the loading rate of 100 mm·min^{-1}. No significant difference between root length, tensile force, and tensile strength of alfalfa root was observed (P<0.05). The root diameter of alfalfa showed a significant influence on root tensile force and tensile strength (P<0.001). The root diameter was positively correlated with root tensile strength by a power function (R^2=0.380, P<0.001) and negatively correlated with root tensile strength by a power function (R^2=0.363, P<0.001). The regression model about the impact of various factors on the alfalfa root tensile force and tensile strength showed that root diameter was the main factor affecting the tensile properties.

Keywords: alfalfa; tensile mechanical property; loading rate; root length; root diameter